

УДК 621.396

Антенны в составе широкополосных радиосредств

Веденькин Д. А., Седельников Ю. Е.

Постановка задачи: при проектировании широкополосных радиоустройств с антеннами, сфокусированными в зоне ближнего излученного поля, необходимо учитывать частотную зависимость их характеристик. Для широкополосных сигналов отсутствует единый подход к определению пространственного распределения электромагнитного поля, а возможность фокусировки некогерентного излучения остаётся недостаточно изученной. **Целью работы** является выявление и анализ свойств широкополосных электромагнитных полей, сфокусированных линейными и плоскими апертурами в зоне ближнего излученного поля, включая случай некогерентного излучения. **Используемые методы:** исследование основано на численном моделировании электромагнитных полей, создаваемых непрерывными и дискретными апертурами в зоне ближнего излученного поля, с учётом спектральных характеристик излучаемого сигнала, способа его приёма и условий когерентности излучения. **Новизна:** впервые проведено систематическое сравнение свойств, сфокусированных гармонических и широкополосных полей в зоне ближнего излученного поля. Показана возможность фокусировки некогерентного широкополосного излучения за счёт синхронизации огибающих радиоимпульсов, что позволяет увеличить напряжённость поля в заданной области без увеличения общей мощности излучения. **Результат.** Установлено, что пространственные распределения широкополосного сфокусированного поля существенно зависят не только от ширины спектра излучаемого сигнала, но и от частотных характеристик приёмного тракта, а также от способа использования энергии поля (режим приёма линейным детектором или режим поглощения мощности в среде). Показано, что при фокусировке некогерентного излучения синхронизация огибающих радиоимпульсов позволяет увеличить напряжённость поля в заданной области без увеличения общей мощности излучения. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке антенных систем для микроволновой диагностики, медицинской радиотермометрии, специальной радиосвязи и радиоэлектронной борьбы, а также для построения энергоэффективных радиолиний с концентрацией широкополосного поля в заданной области пространства.

Ключевые слова: сфокусированные антенны, зона ближнего излученного поля, широкополосные сигналы, антенные решетки, пространственное распределение поля, фокусировка, некогерентное излучение.

Актуальность

Интенсивное развитие теории антенн относится к концу 40-х годов прошлого века. В результате были заложены основы апертурной теории антенн для дальней зоны излучения, ставшей к настоящему времени классической. К этому же времени относятся и первые работы, изучавшие свойства антенн в промежуточной зоне [1]. Однако серьезного продолжения они не получили, так как не были востребованы практикой. Ситуация стала кардинально изменяться к концу прошлого столетия, когда стали интенсивно развиваться такие направления как микроволновые технологии, микроволновая техническая диагностика, ме-

Библиографическая ссылка на статью:

Веденькин Д. А., Седельников Ю. Е. Антенны в составе широкополосных радиосредств // Системы управления, связи и безопасности. 2026. № 2. С. 81-104. DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-081-104

Reference for citation:

Vedenkin D. A., Sedelnikov Yu. E. Antennas as part of broadband radio equipment. *Systems of Control, Communication and Security*, 2026, no. 2, pp. 81-104 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2026-2-081-104

дицинские терапевтические и диагностические приложения, а также, в последние десятилетия, и работы в областях специальной радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Вследствие этого результаты исследований и разработок в области теории и практики антенн в промежуточной зоне оказались востребованными и интенсивно развиваются. Наибольший интерес и наибольшее число выполненных работ относится к антеннам, сфокусированным в зоне ближнего излученного поля (ЗБИП) – в области пространства, примыкающей к границе ближней зоны и протирающей на расстояние порядка нескольких размеров апертуры. В результате, к настоящему времени получены основные результаты, которые можно рассматривать как основы апертурной теории антенн, практически созданы основы апертурной теории антенн для гармонических электромагнитных полей (ЭМП) в зоне ближнего излученного поля [2-10] и др.

На практике все более находят применение широкополосные системы, использующие принцип фокусировки в зоне ближнего излученного электромагнитного поля. В частности, к ним относятся аппаратура медицинской радиотермометрии, радиоволнового неразрушающего контроля, специальной радиосвязи и радиоэлектронной борьбы, микроволновых технологий и некоторые другие [10-23]. Свойства антенн этих радиосредств во многом определяют их технические характеристики. Поэтому перечень актуальных задач теории и техники антенн включает вопросы исследования как свойств сфокусированных широкополосных (ШП) электромагнитных полей, так и антенн, реализующих их возбуждение в зоне ближнего излученного поля. К настоящему времени эти вопросы, хотя и затрагивались в отдельных публикациях [24-25], но не получили исчерпывающего рассмотрения. Настоящая работа посвящена рассмотрению свойств сфокусированных широкополосных электромагнитных полей. Вопросам построения антенных решеток, их анализу и синтезу планируется посвятить отдельную работу.

Сфокусированные антенны

В понятие «фокусировка» обычно вкладывается смысл возбуждения электромагнитного поля, сконцентрированного в некоторой области пространства. Для монохроматического поля в дальней зоне фокусировка может пониматься как возбуждение протяженным источником неоднородной сферической волны, амплитуда которой имеет максимально возможное значение в заданном направлении (θ_0, φ_0) или, в более общем виде, значение вектора Пойнтинга, которое сконцентрировано преимущественно в ограниченном секторе углов. В этих случаях в радиальном направлении поле представляет собой неоднородную сферическую волну с монотонным убыванием напряженности поля обратно пропорциональным расстоянию до точки наблюдения.

Таким образом, для монохроматического поля, создаваемого источником конечных электрических размеров в дальней зоне, фокусировка возможна в двумерной области пространства – в некотором телесном секторе углов (с максимумом в некотором угловом направлении (θ_0, φ_0)). В промежуточной зоне, а именно в ее части примыкающей к условной границе ближней зоны, (зоне ближнего излученного поля [1, 2]), может быть реализована фокусировка в

трехмерной области пространства, с максимумом в заданной точке (x_0, y_0, z_0) . В этом случае имеет место повышенная концентрация энергии электромагнитного поля в ее окрестности. Соответствующие иллюстрации приведены на рис. 1.

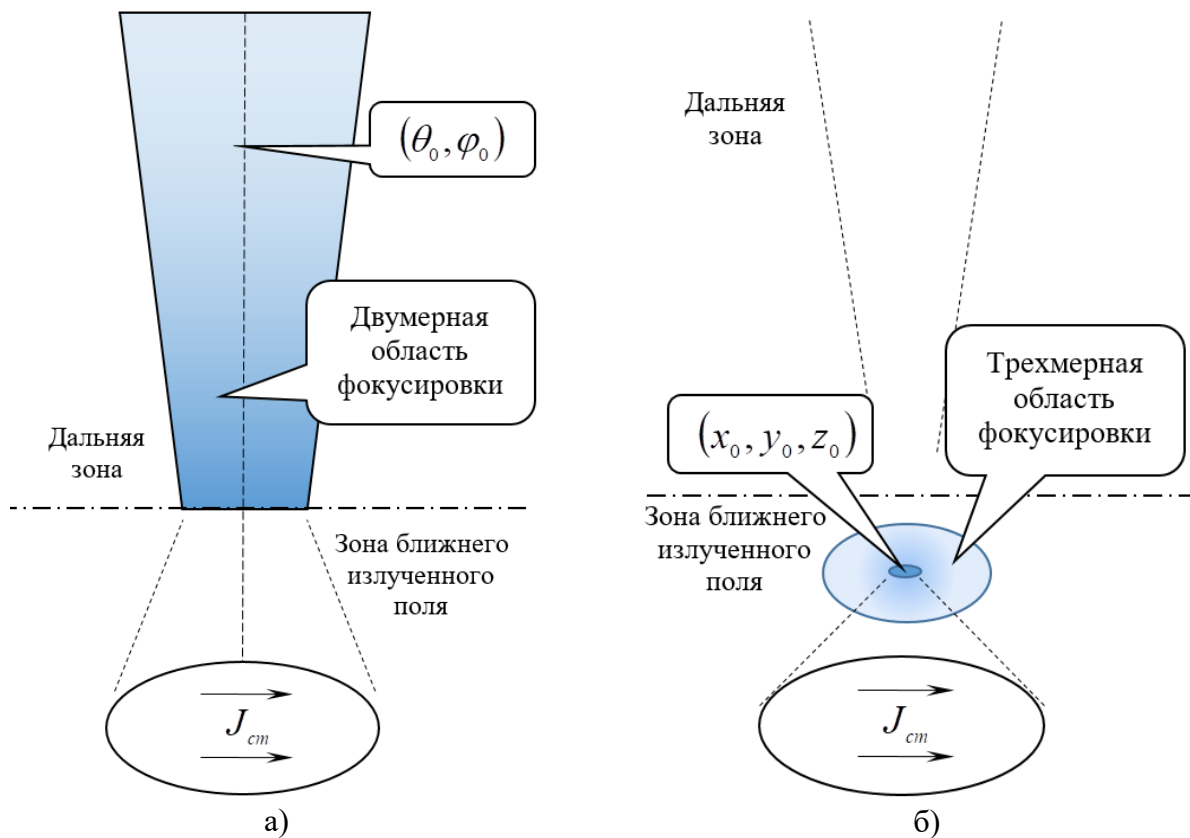


Рис. 1. Области фокусировки: а) – двумерная в дальней зоне, б) – трехмерная в зоне ближнего излученного поля

В окрестности фокуса функция распределения интенсивности электромагнитного поля имеет вид более или менее узкого «пика», окруженного «всплесками» меньшей интенсивности, аналогичными боковым лепесткам диаграммы направленности антенны в дальней зоне.

На рис. 2 показано типичное пространственное распределение горизонтальной и вертикальной компонент напряженности поля линейной антенны, сфокусированной в зоне ближнего излученного поля. Для общности проводимых оценок параметров пространственных распределений сфокусированных ЭМП в качестве расстояний удобно использовать величины, нормированные к длине волны ЭМП. Для ШП ЭМП нормирование расстояний осуществляется по длине волны, соответствующей наиболее интенсивной частотной компоненте спектра.

Для случаев двумерной (например, плоской) апертуры общий характер пространственного распределения ЭМП совпадает с пространственным распределением напряженности сфокусированного поля, сформированного линейной сфокусированной антенной с тем отличием, что в нем присутствуют три компоненты – две горизонтальные и одна вертикальная.

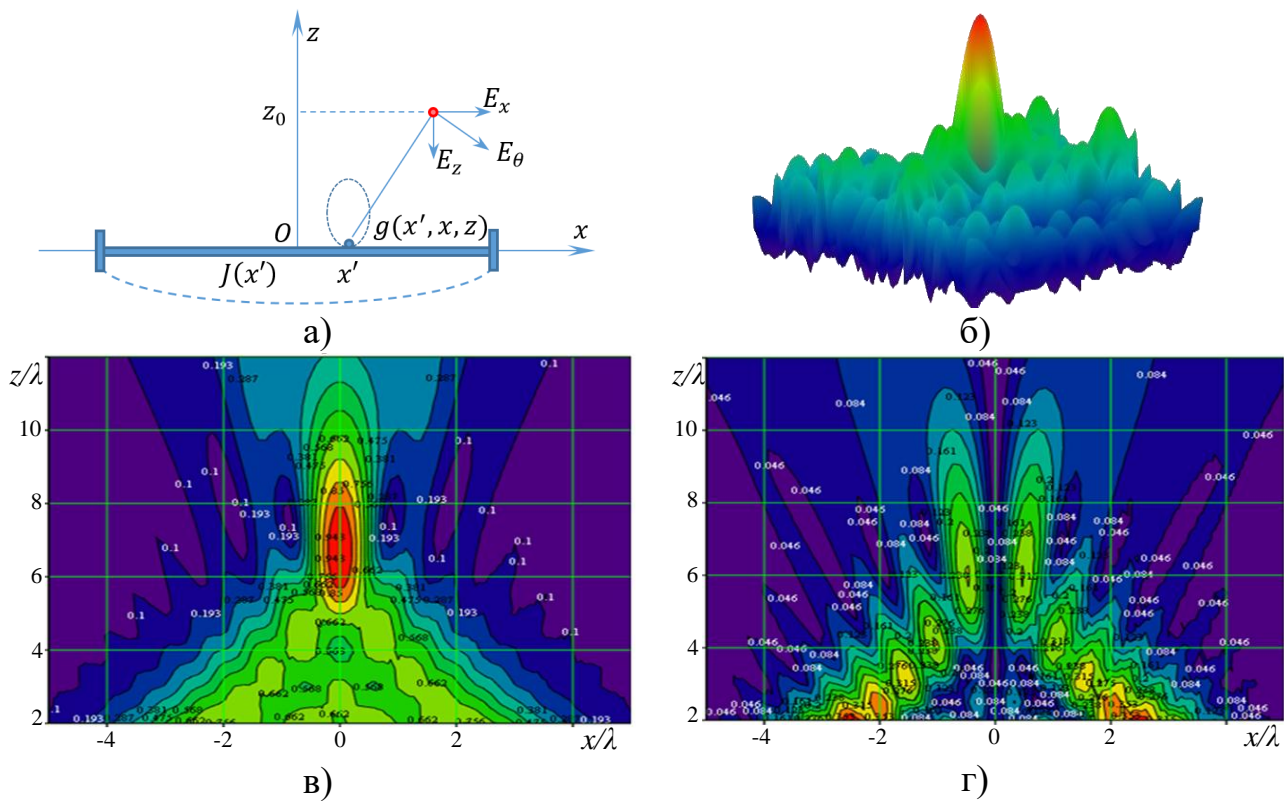


Рис. 2. Фокусировка поля линейной антенной: а) – геометрия линейной антенны, б) – пространственное распределение напряженности сфокусированного поля, в) – распределение горизонтальной компоненты интенсивности поля в плоскости XOZ , г) – распределение вертикальной компоненты поля в плоскости XOZ

На рис. 3 показаны геометрия плоской сфокусированной антенны и пространственные распределения горизонтальных и вертикальной компонент ЭМП, сфокусированного в зоне ближнего излученного поля.

Свойства сфокусированных гармонических полей хорошо изучены и описаны, в частности в [26]. В отличие от случая дальней зоны, когда важнейшие из свойств были получены аналитически, в том числе с использованием математического аппарата теории целых функций, для зоны ближнего излученного поля основные закономерности установлены путем проведения прямого численного моделирования. Для последующего рассмотрения параметров сфокусированного электромагнитного поля опишем наиболее важные свойства:

1. В продольном направлении фокусировка возможна только на расстоянии от апертуры не более нескольких ее геометрических размеров.
2. В поперечном и продольном направлениях минимальные возможные размеры сфокусированного «пятна» не превышают значений порядка 0,5 и 1,5 длины волны.
3. Размеры сфокусированной области в продольном и поперечном направлениях определяются относительным фокусным расстоянием z_0/L , где z_0 – фокусное расстояние, L – геометрическая длина сфокусированной антенны. По мере его увеличения эти размеры увеличиваются пропорционально $(z_0/L)^2$ и (z_0/L) соответственно.

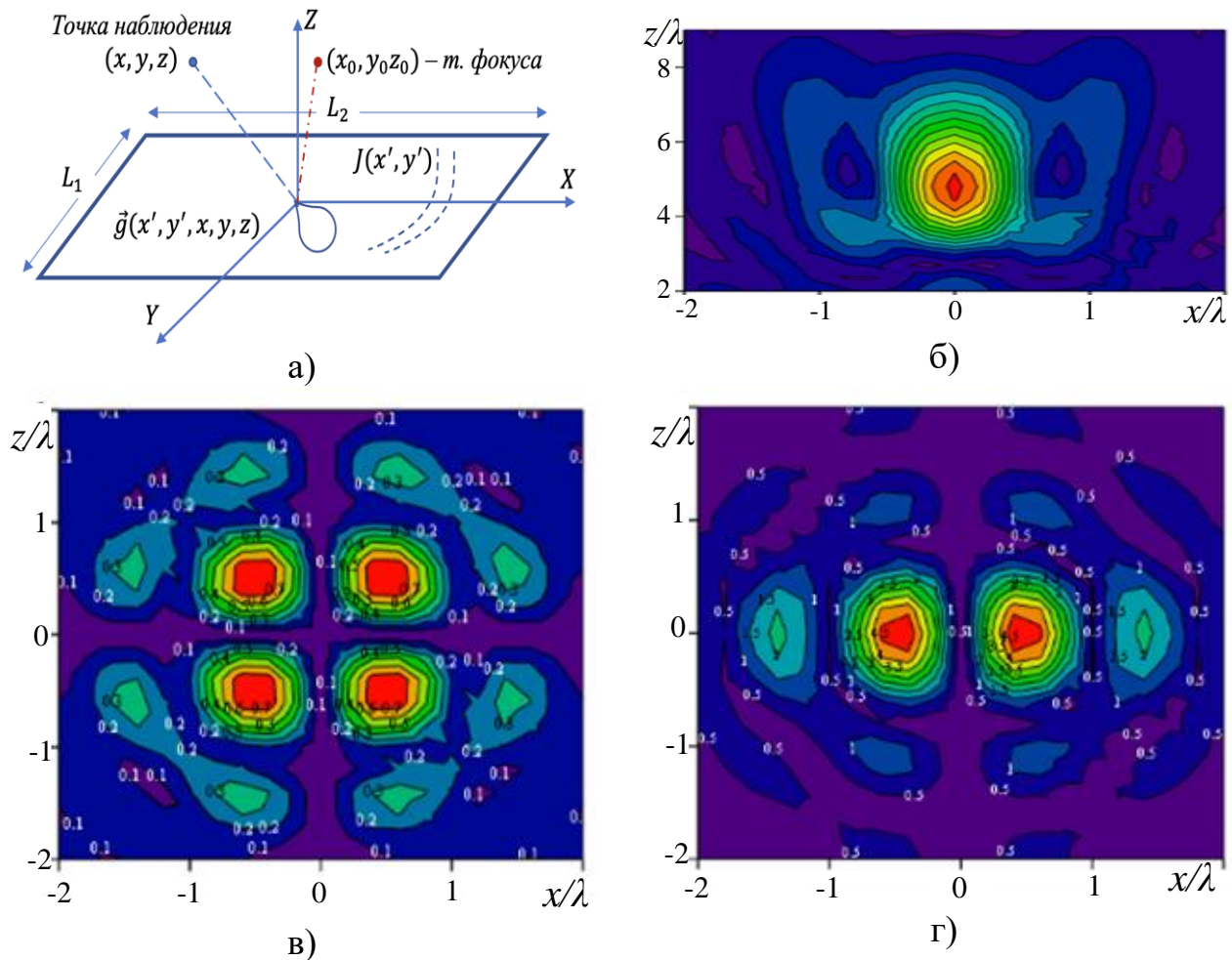


Рис. 3. Фокусировка поля плоской антенной: а) – геометрия плоской антенны, б) – распределение горизонтальной компоненты поля в плоскости $X0Z$, в) – распределение ортогональной компоненты $E_y(x, z)$ в фокальной плоскости ($z = z_0$), г) – распределение вертикальной компоненты $E_z(x, z)$ в фокальной плоскости

4. Уровни боковых лепестков, по сравнению с дальней зоной, имеют большие значения (порядка $-10 \dots -20$ дБ) и в меньшей мере зависят от формы амплитудного распределения токов в апертуре.
5. Для дискретных антенн (антенных решеток) имеет место возникновение повышенных значений уровня боковых лепестков при величине шага решетки порядка $0,8$ длины волны и более.
6. Величина коэффициента направленного действия (КНД) в зоне ближнего излученного поля ограничена значением z_0/L
7. Реализации фокусировки в наклонном направлении возможна в направлении от нормали порядка 45° . При большем отклонении происходит сильная деградация фокусирующих свойств с полной их утратой в продольном направлении.

Принципиальным отличием антенн в составе широкополосных и сверхширокополосных радиосредств является следующее. Любой антенне свой-

ственно в той или иной мере наличие частотных изменений характеристик излучения и приема. Для относительно узкополосных радиоустройств этими изменениями в полосе частот, соответствующих спектру радиосигнала, можно пренебречь. По этой причине такие показатели как диаграмма направленности (ДН) антенны, КНД и др. в дальней зоне, а также параметры пространственного распределения поля в промежуточной зоне считаются постоянными в полосе частот сигнала и, соответственно, достаточно их рассмотрение для монохроматического сигнала.

Для антенн широкополосных и сверхширокополосных радиоустройств эти изменения могут быть столь значительными, что пренебрегать ими невозможно и приходится изначально считаться с наличием заметной частотной зависимости как характеристик направленности $F(\theta, \varphi, f)$, так и пространственных распределений поля излучения в промежуточной зоне $E(x, y, z, f)$. В этих условиях становится невозможным рассматривать свойства электромагнитного поля антенны в отрыве не только от спектрального состава излучаемого радиосигнала, но и от способа его «использования» в точке наблюдения. Поэтому само определение пространственного распределения поля для случая несинусоидального (широкополосного) сигнала, как и ДН антенны в составе широкополосных и сверхширокополосных радиоустройств становится неоднозначным.

Рассмотрение свойства таких электромагнитных полей с учетом временной зависимости отличной от гармонического процесса является целью настоящей статьи. При рассмотрении процесса формирования и свойств результирующего пространственно-временного распределения электромагнитного поля удобным и наглядным является использование представления процессов излучения и приема в частотной области.

Электромагнитное поле протяженного источника несинусоидальных колебаний

В целях наглядности ограничимся рассмотрением линейных антенн. Отметим, что при рассмотрении электромагнитных полей в зоне ближнего излученного поля следует использовать представление их в прямоугольной системе координат. В этом случае, в отличие от записи в сферической системе координат, вид выражений (1-2) не зависит от выбора начала координат [26].

Пусть в точке пространства с координатами (x, z) линейной непрерывной апертурой (рис. 2, а) с частотой излучения f_0 создается поле $E_n(x, z, f_0)$:

$$E_n(x, z, f_0) = \int_{-L/2}^{L/2} \dot{J}(x', x_0, z_0) \dot{g}(x', x, z) \frac{\exp[-jk(f_0)r(x', x, z)]}{r(x', x, z)} dx'. \quad (1)$$

Аналогично, для случая линейной дискретной апертуры

$$E(x, z, f_0) = \sum_{i=1}^N \dot{J}_i(x'_i, x_0, z_0) \dot{g}(x'_i, x, z) \frac{\exp[-jk(f_0)r_i(x'_i, x, z)]}{r_i(x'_i, x, z)}, \quad (2)$$

где $\dot{J}_i(x'_i, x_0, z_0)$ и $\dot{J}(x', x_0, z_0)$ – апертурные распределения, обеспечивающее фокусировку электромагнитного поля в точку (x_0, z_0) , $\dot{g}(x', x, z)$ – значение напряжен-

ности поля в точке (x, z) , сформированного источником, находящимся в точке x' апертуры (диаграмма направленности элементарного участка апертуры).

При возбуждении широкополосным колебанием со спектром $G(f)$ полная амплитуда электромагнитного поля в точке наблюдения (x, z) может быть представлена с использованием функций $E(x, z, f)$ и $G(f)$. Для того, чтобы количественно охарактеризовать эту величину, как функцию пространственных координат (x, z) необходимо предварительно определить каким именно образом значения величин $E(x, z, f)$ и $G(f)$ «используются» в данном конкретном случае. Возможны различные варианты функционирования, соответствующие как «работе» антенны в радиолинии в режиме передачи некоторых широкополосных сигналов, или приема сигналов, излучение которых осуществляется некоторым радиопередающим устройством.

Функционирование в режиме передачи. Условная схема радиолинии с антенной, сфокусированной в режиме передачи показана на рис. 4.

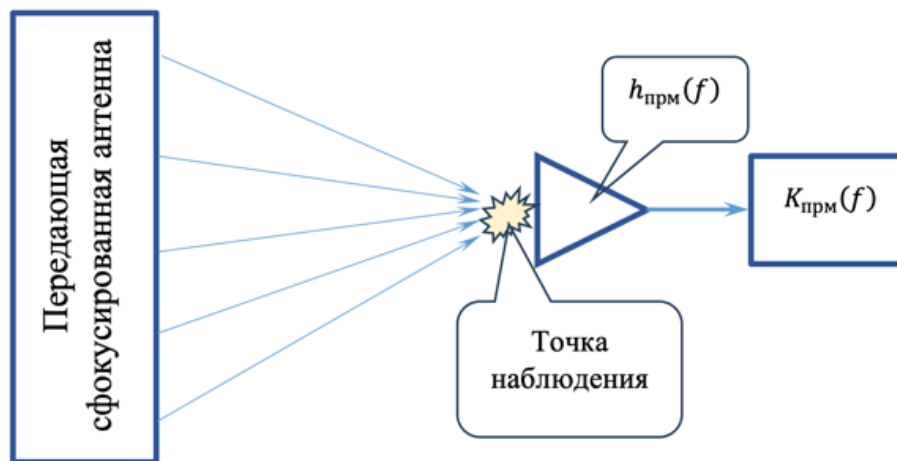


Рис. 4. Широкополосная антенна, сфокусированная в режиме передачи

В режиме передачи возможны, по крайней мере, два характерных случая. Во-первых, речь может идти о величине, соответствующей квадрату модуля вектора напряженности электрического поля или, в общем случае – поглощенной мощности в точке (x, z) .

$$|E(x, z)|^2 = \int_{f_1}^{f_2} |E(x, z, f)|^2 df, \quad (3)$$

$$P_{\text{полг}}(x, z) = \int_{f_1}^{f_2} \sigma(x, z, f) |E(x, z, f)|^2 df. \quad (4)$$

Соответственно, для случая однородной среды характеристикой пространственного распределения энергии сфокусированного широкополосного ЭМП для антенны в режиме передачи может служить величина

$$|E_{\text{ин}}^{\text{прд.эн}}(x, z)|^2 = \int_{f_1}^{f_2} |E(x, z, f)|^2 df. \quad (5)$$

Во-вторых, количественная оценка работы сфокусированной широкополосной антенны в режиме передачи может быть осуществлена для случая, когда в точке (x, z) расположено радиоприемное устройство с линейным приемником с частотной характеристикой $K_{\text{прм}}(f)$, рис. 5.

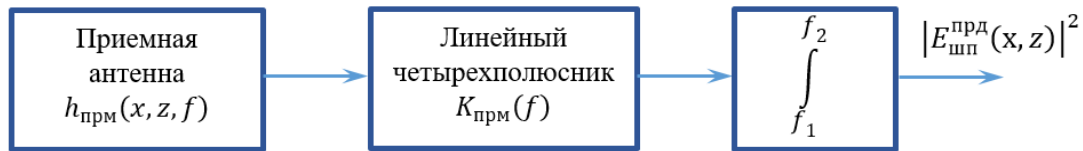


Рис. 5. К приему широкополосного сфокусированного излучения

В этом случае характеристикой пространственного распределения сфокусированного широкополосного электромагнитного поля является величина мощности «принимаемого» сигнала, оцениваемого по формуле

$$|E_{\text{шп}}^{\text{прд}}(x, z)|^2 = \left| \int_{f_1}^{f_2} E(x, z, f) h_{\text{прм}}(x, z, f) G(f) K_{\text{прм}}(f) df \right|^2, \quad (6)$$

где $h_{\text{прм}}(x, z, f)$ – действующая высота приемной антенны заданной ориентации, $K_{\text{прм}}(f)$ – коэффициент передачи линейного четырехполосника в составе приемного устройства.

Функционирование в режиме приема. Условная схема радиолинии со сфокусированной широкополосной антенной, функционирующей в режиме приема показана на рис. 6.

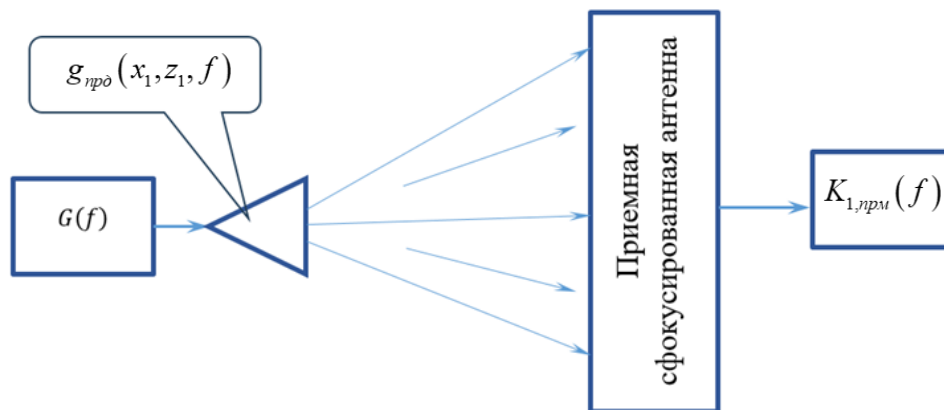


Рис. 6. Широкополосная сфокусированная антенна, функционирующая в режиме приема

Пусть в точке передачи находится источник, которым в области нахождения приемной антенны создается поле, пропорциональное $g_{\text{прд}}(x_1, z_1, f)$. Если прием осуществляется линейным приемником с частотной характеристикой $K_{1,\text{прм}}(f)$, а рассматриваемой антенной в режиме передачи создается поле с напряженностью $E_{\text{прд}}(x_1, z_1, f)$, то сигнал с точностью до постоянной (в силу принципа взаимности) на выходе линейного приемника с широкополосной сфокусированной приемной антенной имеет вид:

$$\left| E_{ин}^{нрм}(x_1, z_1) \right|^2 = \left| \int_{f_1}^{f_2} E_{нр\delta}(x_1, z_1, f) g_{нр\delta}(x_1, z_1, f) G(f) K_{1,нрм}(f) df \right|^2. \quad (7)$$

В общем случае значения $h_{нрм}(x, z, f)$ и $g_{нр\delta}(x_1, z_1, f)$, а также $K_{нрм}(f)$ и $K_{1,нрм}(f)$ не совпадают, что может трактоваться как неравенство функций, характеризующих пространственные распределения в режиме приема и передачи. Это обстоятельство ни коим образом не является нарушением принципа взаимности, а означает лишь различие в «использовании» частотных составляющих широкополосного сигнала.

Заметим, что в общем случае может оказаться нецелесообразным раздельное рассмотрение свойств антенн в режиме приема и передачи. Соответственно, следует переходить к введению представления радиолинии содержащей передающую и приемную части, характеризуемые спектром излучаемого сигнала, частотнозависимыми параметрами передающей и приемной антенн, частотными характеристиками среды распространения и тракта обработки. В дальнейшем, при рассмотрении свойств широкополосных сфокусированных электромагнитных полей для простоты примем значения $h_{нрм}(x, z, f)$ и $g_{нр\delta}(x_1, z_1, f)$ равными друг другу и не зависящими от частоты и пространственного положения.

В качестве иллюстрации на рис. 7 приведены пространственные распределения сфокусированного ЭМП согласно критерию (6), создаваемые линейной сфокусированной антенной решеткой, состоящей из 11 элементов с равномерной ДН элементарного излучателя решетки, шагом $0,7 \cdot \lambda$ и равномерным амплитудным распределением возбуждающих токов. Поле сфокусировано в точку с координатами $(0,5\lambda_0)$, полоса частот в процентах от центральной частоты f_0 оценивается по формуле $\delta f_{омн} = 100\% \cdot \Delta f / f_0$ и составляет 1,25% для узкополосного электромагнитного поля и 25 % для широкополосного поля.

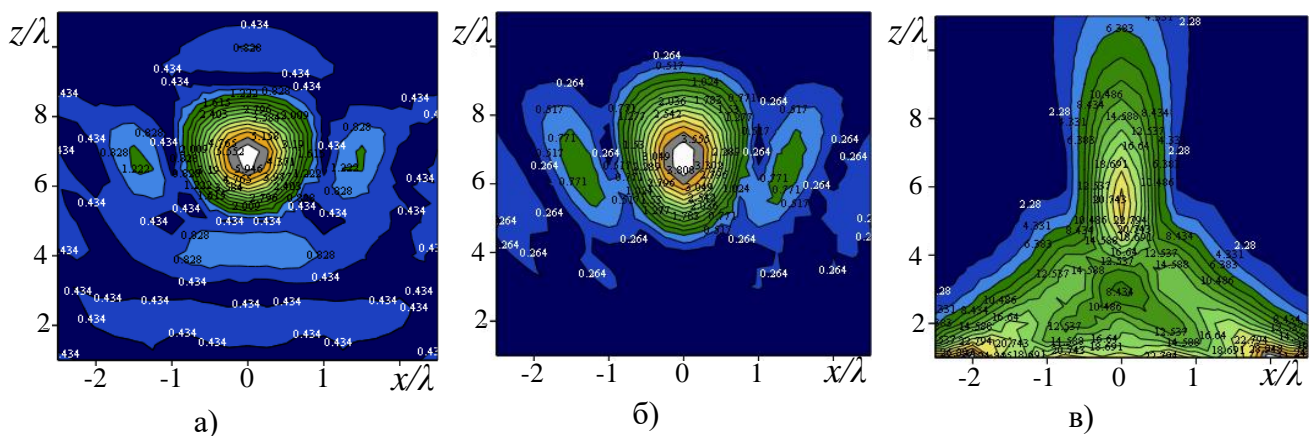


Рис. 7. Пространственные распределения сфокусированного поля в режиме передачи: а) – прием ШП сигнала при $K_{нрм}(f) = 1$, б) – прием ШП сигнала при

$$K_{нрм}(f) = 2 \cos \frac{\pi f_0}{2 \Delta f}, \text{ в) – прием узкополосного сигнала при } K_{нрм}(f) = 1$$

Проиллюстрируем на рис. 8 наличие зависимости формы и параметров пространственного распределения широкополосного сфокусированного поля с равномерным спектром $G(f)=1$ относительной шириной $\delta f_{\text{омн}} = 25\%$ от вида весовой функции $K_{\text{нрм}}(f)$. Как видно из данных на рис. 8, в продольном направлении зависимость формы пространственного распределения является более выраженной.

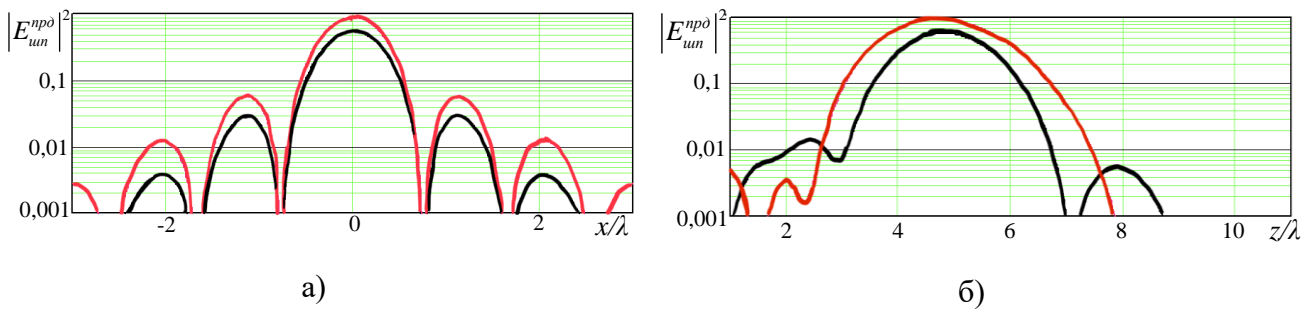


Рис. 8. Логарифмические зависимости $|E_{\text{ун}}^{\text{нр}\delta}(x, z)|^2$ для различных видов весовой функции $K_{\text{нрм}}(f)=1$ (черная линия) и $K_{\text{нрм}}(f)=2 \cos \frac{\pi}{2} \frac{f_0}{\Delta f}$ (красная линия) для а) – поперечного направления, б) – продольного направления

Приведем на рис. 9-10 графики, иллюстрирующие осевые распределения энергии, согласно критерия (6), для узкополосных и широкополосных ЭМП, сфокусированных в ЗБИП. Параметры сфокусированной антенной решетки идентичны случаю, изображенному на рис. 7 и рассчитаны для случая «приема» линейным приемником с $K_{\text{нрм}}(f)=1$.

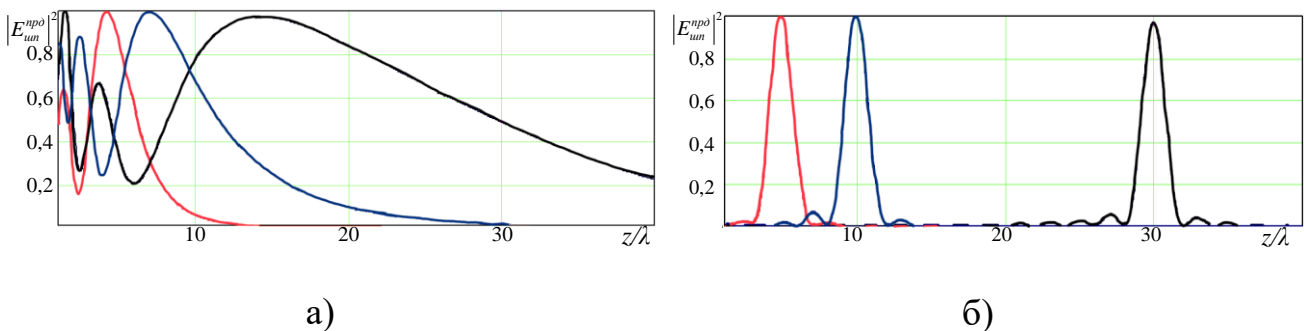


Рис. 9. Зависимости $|E_{\text{ун}}^{\text{нр}\delta}(x, z)|^2$ в продольном направлении при различном положении точки фокусировки для сфокусированных ЭМП с относительной шириной спектра: а) $\delta f_{\text{омн}} = 1,25\%$, б) $\delta f_{\text{омн}} = 25\%$

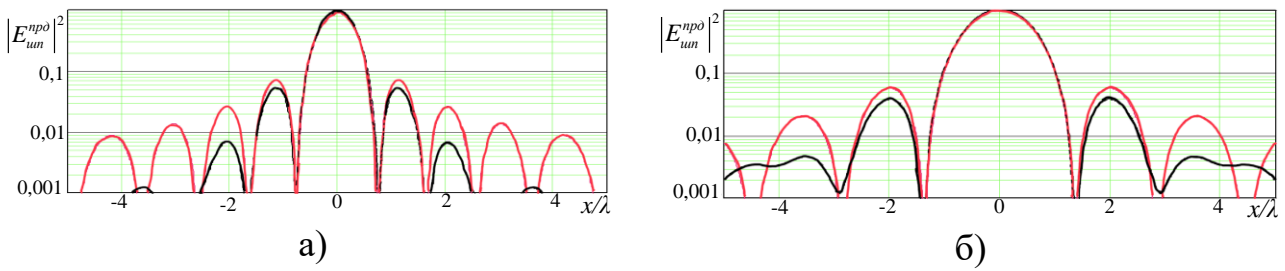


Рис. 10. Логарифмические зависимости $|E_{un}^{npd}(x, z)|^2$ в поперечном направлении для сфокусированных ЭМП с относительной шириной спектра $\delta f_{omni} = 1,25\%$ (красная линия) и $\delta f_{omni} = 25\%$ (черная линия) при различном положении точки фокусировки: а) точка фокусировки – 5 б) точка фокусировки – 10

Данные, приведенные на рис. 11, иллюстрируют возможность сканирования при различной ширине полосы частот. Хорошо видно, что в случае узкой полосы частот возможность фокусировки в наклонном направлении ограничена значениями отклонения от нормали не более величины порядка нескольких десятков градуса.

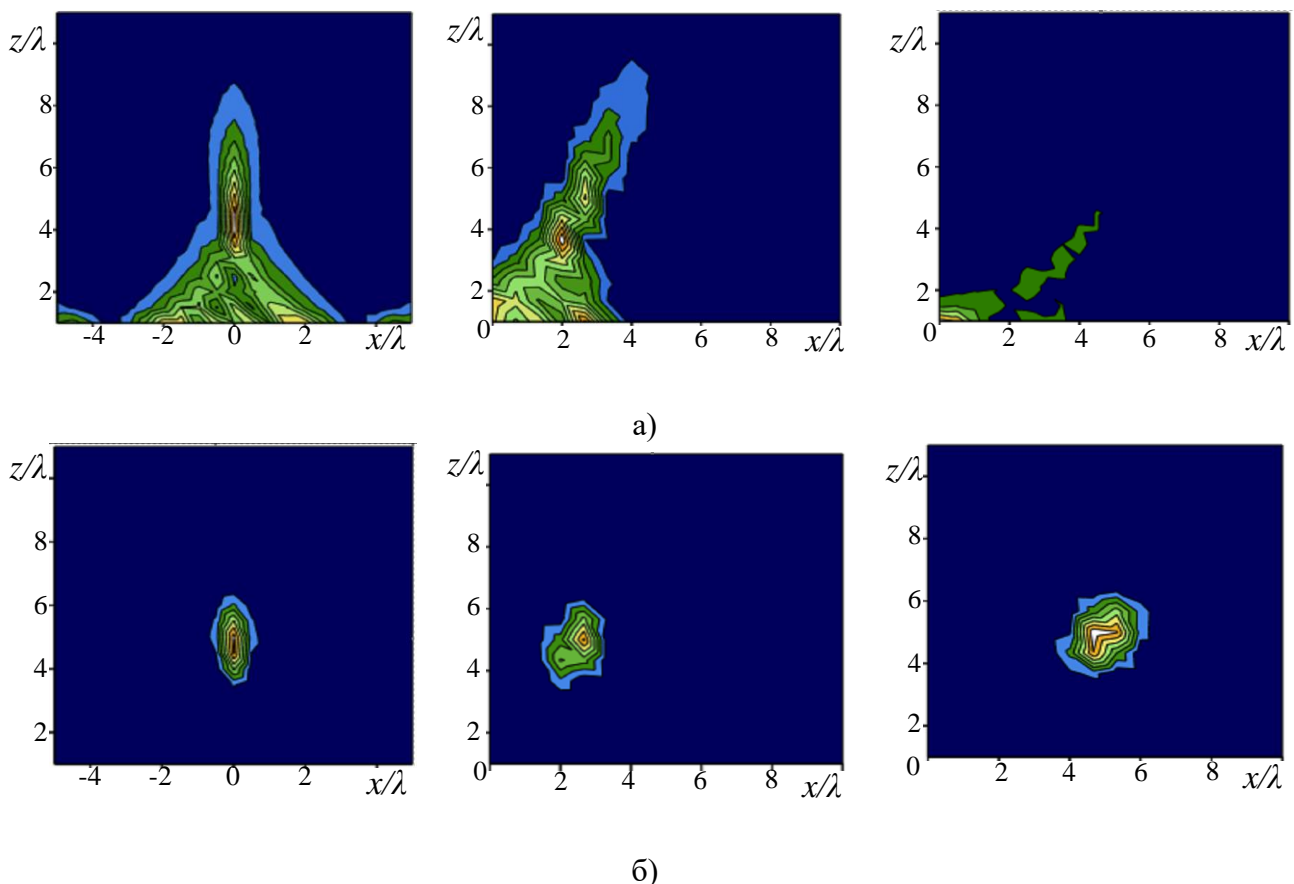


Рис. 11. Пространственные зависимости $|E_{un}^{npd}(x, z)|^2$ при отклонении точки фокусировки от нормали для случаев а) – узкой полосы частот $\delta f_{omni} = 1,25\%$; б) – широкой полосы частот $\delta f_{omni} = 25\%$

Основные свойства широкополосных сфокусированных электромагнитных полей

Как уже отмечалось выше, свойства сфокусированных гармонических полей хорошо изучены и описаны. Для случаев фокусировки широкополосных (несинусоидальных) полей основные их свойства не могут быть установлены аналитически. Как и для монохроматических полей они выявлены и установлены путем численных экспериментов, в ходе которых, на основе классических представлений полей элементарных источников в указанной зоне рассчитываются поля, создаваемые рассматриваемыми апертурами. Приведем в таблице 1 сравнения основных свойств гармонических и негармонических (широкополосных) сфокусированных электромагнитных полей для случая «приема» излучения линейным приемником.

Таблица 1 – Случай «приема» излучения линейным приемником

Свойства монохроматического сфокусированного поля в ЗБИП	Свойства несинусоидального (широкополосного) сфокусированного поля в ЗБИП	Примечания
Для фокусировки в ЗБИП в направлении близком к нормали		
Имеется выраженная область фокусировки – области повышенной концентрации ЭМП окруженная боковыми лепестками	Аналогично	Термин «боковые лепестки» использован для наглядности. Точнее: вторичные области повышенной интенсивности
Размеры области фокусировки в долях длины волны определяются величиной относительного фокусного расстояния и ограничены им.	На центральной частоте спектра – аналогично по порядку величины	Дополнительно: в режиме передачи зависят также от свойств приемника
По мере увеличения величины фокусного расстояния происходит расширение области фокусировки.	На центральной частоте спектра – аналогично	При спектре несимметричном – относительно наиболее интенсивной частоты спектра
При значении величины фокусного расстояния порядка нескольких значений размера апертуры происходит утрата свойства фокусировки в направлении поперечном от апертуры	Свойство фокусировки сохраняется. Размеры сфокусированной области в направлении поперечном от апертуры при значении величины фокусного расстояния не более нескольких значений размера апертуры сохраняются. Размеры области фокусировки зависят также от ширины полосы частот спектра как $(V_{\phi} \Delta f)$.	В случае значительно ширины полосы частот спектра ее влияние становится преобладающим

Свойства монохроматического сфокусированного поля в ЗБИП	Свойства несинусоидального (широкополосного) сфокусированного поля в ЗБИП	Примечания
Для фокусировки в ЗБИП в направлении близком к нормали		
При значении величины фокусного расстояния порядка нескольких значений размера апертуры в поперечном направлении размеры области фокусировки увеличиваются пропорционально величине фокусного расстояния	на центральной частоте спектра аналогично как $\approx \lambda_{\text{средн}} z_0 / L_{\text{аперт}}$	
Уровни боковых лепестков как правило имеют значительную величину (до -10 дБ) и относительно слабо зависят от формы амплитудного распределения поля в апертуре	имеют несколько меньшее значение причем тем меньшее чем шире полоса частот спектра	
Для антенных решеток (дискретных эквидистантных антенн) при величине шага решетки превышающей величину порядка половины длины волны имеют место вторичные области повышенной концентрации поля аналогично вторичным максимумам ДН разреженной решетки в дальней зоне	частично имеет место тенденция снижения уровней вторичных областей повышенной концентрации по мере расширения полосы частот спектра	
Для фокусировки в ЗБИП в наклонном направлении		
Выраженная область фокусировки – области повышенной концентрации ЭМП имеет место в угловых направлениях, не превышающих 30...45 градусов.	выраженная область фокусировки – области повышенной концентрации ЭМП имеет место в любой точке зоны ближнего излученного поля	
Размеры области фокусировки поперечном направлении имеют тенденцию к расширению по мере увеличения угла отклонения от нормали к апертуре. При больших углах свойство фокусировки утрачивается.	размеры области фокусировки в поперечном направлении в угловых направлениях не превышающих 30...45 градусов несколько увеличиваются по мере удаления точки фокусировки вплоть до значения определяемого шириной частотного спектра излучаемого поля как $(V_{\phi} \Delta f)$	
Свойство фокусировки в направлении распространения волны утрачивается полностью при отклонении точки фокусировки до направления вдоль апертуры	Фокусировка имеет место	

Свойства монохроматического сфокусированного поля в ЗБИП	Свойства несинусоидального (широкополосного) сфокусированного поля в ЗБИП	Примечания
Для фокусировки на расстоянии, превышающем границы ЗБИП		
Размеры области сфокусированного поля в поперечном направлении увеличиваются пропорционально расстоянию от апертуры. Ориентировочная оценка $\Delta_{non} \approx z_0 \lambda / L_{an}$	размеры области фокусировки определяются относительным фокусным расстоянием $\approx \lambda_{средн} z_0 / L_{аперт}$	
Фокусировка в продольном направлении отсутствует.	Фокусировка имеет место. Размер определяется шириной Δf спектра излучения как $(V_\phi \Delta f)$.	

Случай фокусировки широкополосного электромагнитного излучения, соответствующий поглощению в среде

Обобщенное сравнение эффекта фокусировки немонохроматического электромагнитного поля в среде с потерями с целью достижения максимального значения величины поглощенной мощности $\sigma |E|^2$ может быть сформулировано следующим образом. Общие свойства широкополосного сфокусированного поля в ЗБИП практически совпадают с соответствующими свойствами сфокусированных монохроматических полей при равном значении средней частоты спектра широкополосного электромагнитного поля и монохроматического излучения. В случаях несимметричного спектра широкополосного электромагнитного поля характеристики оцениваются соответственно преобладанию высокочастотных или низкочастотных составляющих спектра.

На рис. 12 приведены данные сравнения пространственных распределений $|E_{ун}^{np\delta}(x, z)|^2$ при относительной ширине спектра $\delta f_{омн} = 25\%$ для случаев «приема» линейным приемником с $K_{прм}(f) = 1$ и согласно критерию поглощенной мощности при фокусировке в точку с координатами (0,5), располагающуюся на нормали к середине антенной решетки. На рис. 13 при тех же параметрах антенной решетки и относительной ширины спектра приведены данные пространственных распределений для точки фокусировки с координатами (5,5).

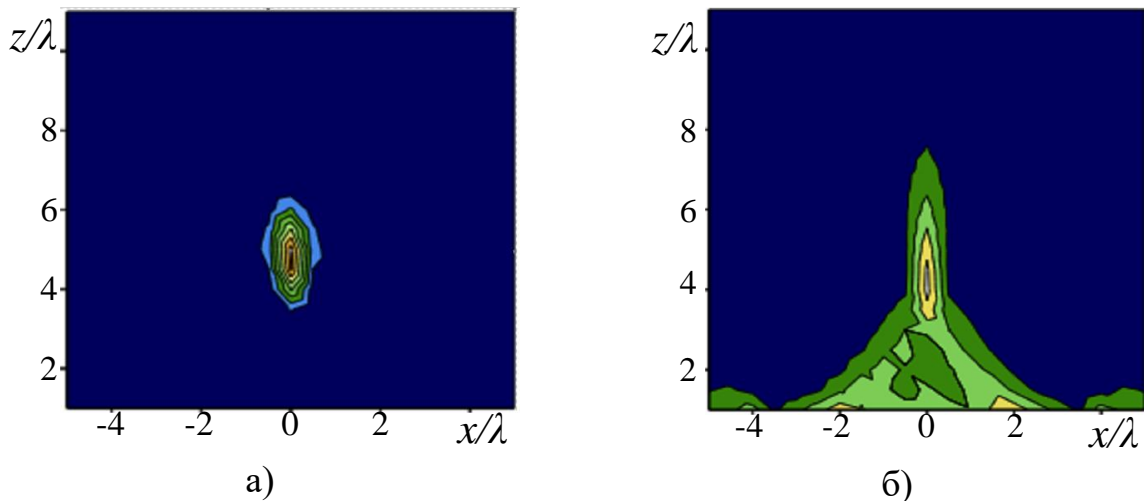


Рис. 12. Пространственные зависимости $|E_{un}^{npd}(x, z)|^2$ при фокусировке в точку с координатами (0,5) а) – согласно критерию «приема» линейным приемником с $K_{прм}(f)=1$, б) – согласно критерию поглощенной мощности

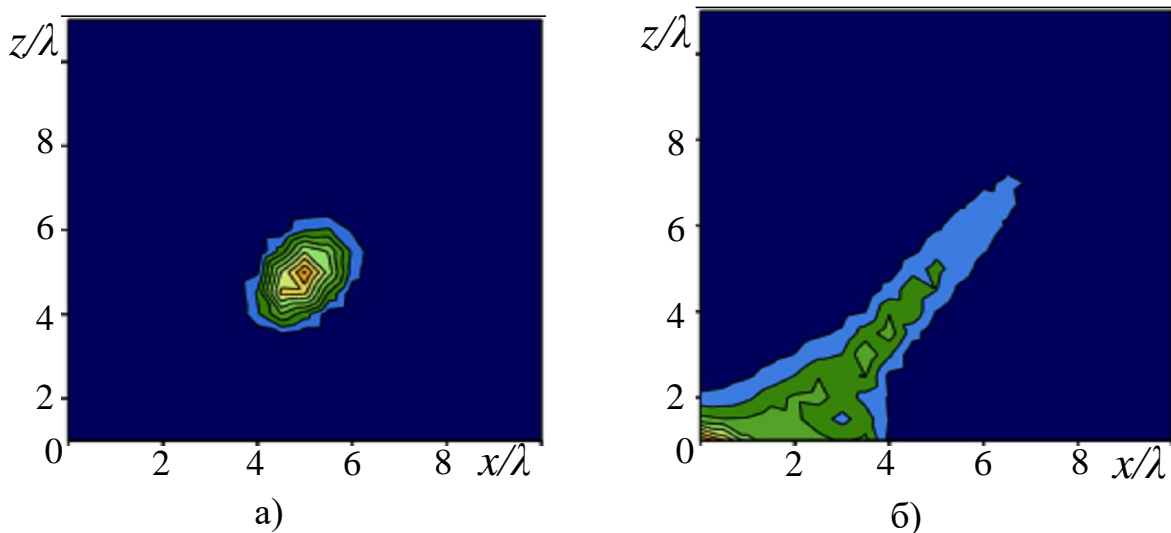


Рис. 13. Пространственные зависимости $|E_{un}^{npd}(x, z)|^2$ при фокусировке в точку с координатами (5,5) а) – согласно критерию «приема» линейным приемником с $K_{прм}(f)=1$, б) – согласно критерию поглощенной мощности

На рис. 14 приведены данные для осевых распределений сфокусированных ЭМП с относительными полосами частот $\delta f_{омн} = 1,25\%$ (красные графики) и $\delta f_{омн} = 25\%$ (синие графики), полученных согласно критерию поглощенной мощности для различных значений фокусного расстояния. Сфокусированное ЭМП формируется линейной эквидистантной антенной решеткой, состоящей из 11 ненаправленных элементов, располагающихся с шагом 0,7 длины волны, рассчитанной относительно средней частоты спектра.

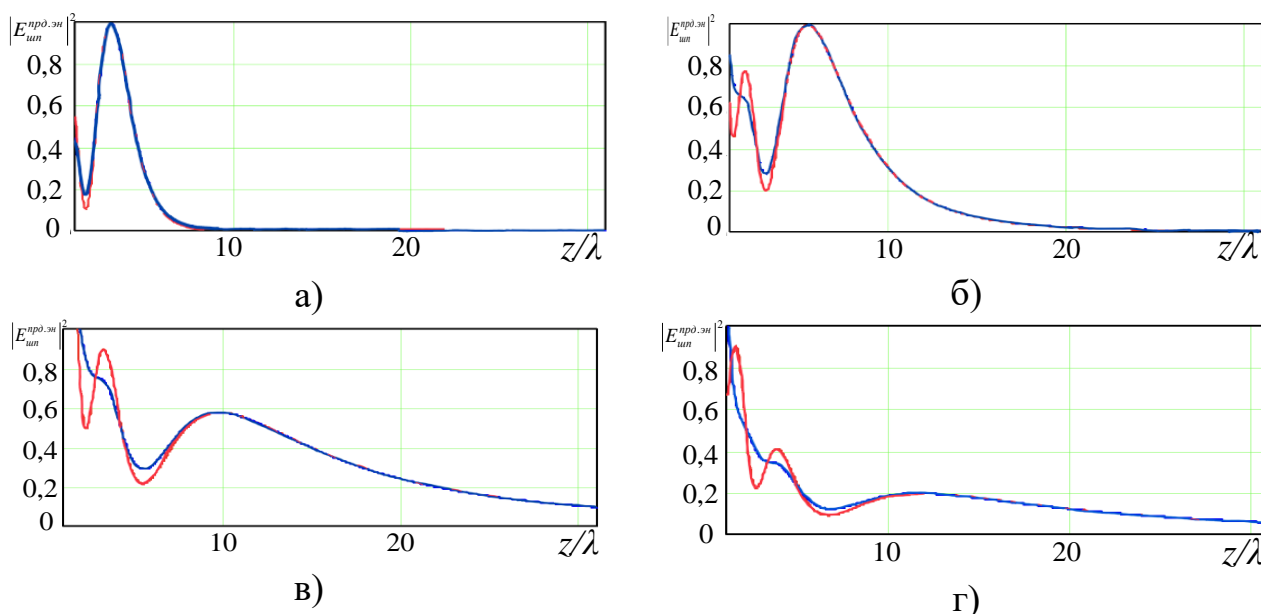


Рис. 14 Осевые распределения сфокусированных полей согласно критерию поглощенной мощности для точек фокусировки: а) – 3,5, б) – 7, в) – 21, г) – 42

Хорошо видно, что при удалении точки фокусировки на расстояние z_0 порядка размера апертуры пространственные распределения для случаев узкой и широкой полос частот практически совпадают. С увеличением z_0 свойство фокусировки в поперечном направлении утрачивается как для случая узкой, так и для случая широкой полосы частот.

Фокусировка некогерентных излучений

Для случая монохроматического излучения принцип фокусировки электромагнитного поля протяженного источника состоит в обеспечении синфазного сложения в заданной области пространства колебаний, соответствующих излучению N отдельных источников (токов) в апертуре. При этом, в области фокусировки напряженность электрического поля увеличивается по порядку величины в \sqrt{N} раз. Излучение отдельных элементов апертуры, для этого, очевидно, должно быть когерентным. В случае широкополосного излучения существует возможность фокусировки без обязательности требования когерентности элементов апертуры. В этом случае в точке фокусировки обеспечивается сложение полей, соответствующих излучению отдельных элементов апертуры таким образом, чтобы огибающие широкополосных сигналов в точке фокусировки являлись синхронными.

В случае излучения идентичных радиоимпульсов и одинаковых расстояний от каждого элемента апертуры до точки фокусировки это означает равенство временных задержек на пути распространения волны от каждого из элементов апертуры до точки фокусировки [11, 27]. В случае различных расстояний до точки фокусировки требуется внести соответствующие временные задержки, величины которых подбираются исходя из условия одновременности прихода отдельных импульсов в точку фокусировки. Для демонстрации воз-

возможностей фокусировки рассмотрим два варианта антенн: одиночный ненаправленный излучатель и антенную решетку из N изотропных элементов при условии равенства подведенных мощностей. При традиционной фокусировке значение вектора Пойнтинга в точке фокусировки увеличивается в N раз. При сложении некогерентных колебаний значение мощности в точке фокусировки остается равным значению, соответствующему одиночному элементу. Возрастает, по сравнению с одиночным элементом значение напряженности поля по порядку величины в \sqrt{N} раз. По мере удаления точки наблюдения от фокуса максимальное значение $|E(t)|$ уменьшается, а размер области фокусировки (длительность импульса), напротив, увеличивается. Иллюстрациями могут служить графики модуля напряженности электрического поля, полученные для эквидистантной некогерентной сфокусированной антенной решеткой с количеством излучателей $N=15$, шагом $\Delta x=10$ м., частотой заполнения 1 ГГц и длительностью огибающей радиоимпульса 5 нс, приведенные на рис. 15.

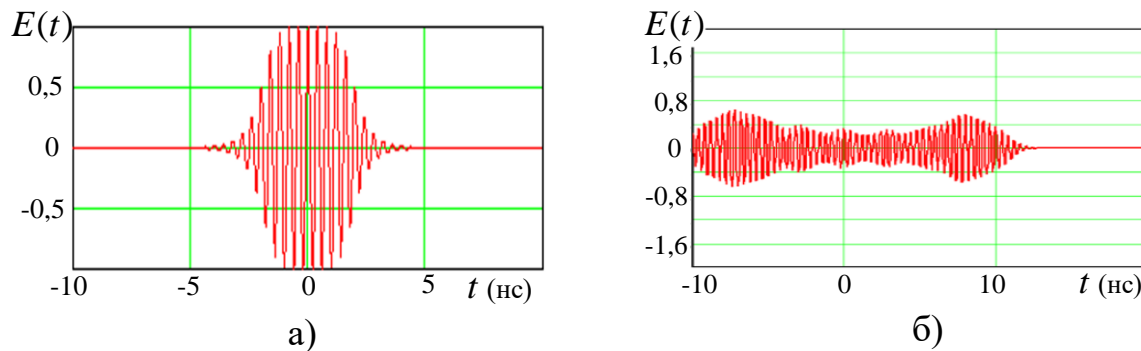


Рис. 15. Модуль напряженности электрического поля $|E(t)|$ эквидистантной некогерентной антенной решетки: а) – в точке фокусировки $(0, 30\lambda_0)$, б) – в точке $(30\lambda_0, 30\lambda_0)$

Таким образом при некогерентной фокусировке оказывается возможным возбудить электромагнитное поле с повышенным, по сравнению с одиночным элементом, значением напряженности поля в заданной части пространства без увеличения общей мощности излучения. На рис. 16 приведены данные сравнения максимальных значений напряженности поля для случаев «когерентной» (красная линия) и «некогерентной» (синяя линия) фокусировки. Линейная сфокусированная решетка состоит из ненаправленных элементов, расположенных с шагом $10\lambda_0$ с равномерным амплитудным распределением. Точка фокусировки задана координатами $(0, 30\lambda_0)$, где λ_0 соответствует средней частоте полосы частот $\delta f_{\text{омн}} = 25\%$. Частота заполнения радиоимпульса 1 ГГц, длительность импульса – 5 нс. В целях наглядности значения нормированы к максимальному значению в случае «когерентной» фокусировки.

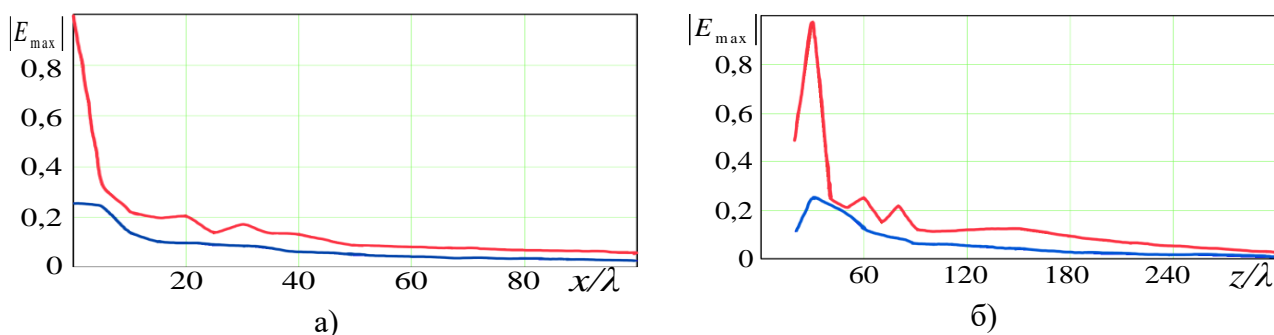


Рис. 16. Максимальные значения напряженности ЭМП для случаев «когерентной» (красная линия) и «некогерентной» (синяя линия) фокусировки:
а) – поперечное направление, б) – продольное направление

Заключение

Приведенные данные показывают наличие существенных отличий свойств широкополосных сфокусированных электромагнитных полей, создаваемых дискретными апертурами в зоне ближнего излученного поля. Наиболее существенным является то, что указанные свойства проявляются различным образом в зависимости от спектра электромагнитных колебаний и способа «использования» значений напряженности поля $E(x, y, z, f)$. Дискретные апертуры можно рассматривать как упрощенную модель антенных решеток. Определение пространственных распределений электромагнитных полей, создаваемых ими в зоне ближнего излученного поля невозможно без детализации типа, состава и характеристик как используемых излучателей, так и распределительного устройства. Указанным вопросам предполагается посвятить отдельную публикацию.

С практической точки зрения результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке перспективных микроволновых технологических комплексов, повышении потенциала радиосвязи, решения задач неразрушающего контроля и технической диагностики.

Авторы выражают сердечную благодарность профессору Морозову Олегу Геннадьевичу, заслуженному деятелю науки и техники РФ, доктору технических наук, за внимание к работе, обсуждение материалов и ценные советы.

Работа выполнена в рамках государственного задания FZSU-2026-0009, рег. номер НИОКТР 126020516512-7.

Литература

1. Bickmore R. W. On focusing electromagnetic radiators // Canadian Journal of Physics. 1957. Vol. 35. no. 11. pp. 1292-1298.

2. Hansen R. C. Focal region characteristics of focused array antennas // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1985. Vol. 33. no. 12. pp. 1328-1337. doi: 10.1109/TAP.1985.1143539.

3. Graham W. J. Analysis and Synthesis of Axial Field Patterns of Focused Apertures // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1983. Vol. AP-31. no. 4. pp. 665-668.

4. Потапова О. В., Седельников Ю. Е. Исследование характеристик электромагнитного поля при погрешностях реализации фокусирующего фазового распределения // Журнал радиоэлектроники. 2024. № 1. doi: 10.30898/1684-1719.2024.1.10.

5. Низамутдинов Р. Р. Исследование характеристик линейных сфокусированных антенн для радиоволновых технологических и диагностических устройств: дис. ... канд. техн. наук. 05.12.07. Казань, КГТУ им. А. Н. Туполева, 2011. 155 с.

6. Chou Hsi-Tseng, Yu Chien-Te. Design of phased array antennas with beam switching capability in the near-field focus applications // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2015. Vol. 9. no. 11. pp. 1120-1127.

7. Kay A. Near-field gain of aperture antennas // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1960. Vol. 8. no. 6. pp. 586-593. doi: 10.1109/TAP.1960.1144905.

8. Nepa P., Buffi A. Near-Field-Focused Microwave Antennas: Near-field shaping and implementation // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2017. Vol. 59. no. 3. pp. 42-53. doi: 10.1109/MAP.2017.2686118.

9. Веденькин Д. А., Седельников Ю. Е. Свойства сфокусированных волновых полей в промежуточной зоне излучения // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2016. № 1 (29). С. 18-31.

10. Веденькин Д. А., Седельников Ю. Е., Насыбуллин А. Р. Фокусировка электромагнитного излучения в диссипативной среде // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017. № 3 (35). С. 61-68.

11. Веденькин Д. А. Фокусированные антенны для систем радиосвязи с группой малоразмерных летательных аппаратов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 5. С. 36-38.

12. Gee W., Lee S.-W., Bong N. K., Cain C. A., Mittra R., Magin R. L. Focused Array Hyperthermia Applicator: Theory and Experiment // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1984. Vol. BME-31. no. 1. pp. 38-46. doi: 10.1109/TBME.1984.325368.

13. Tofigh F., Nourinia J., Azarmanesh M., Khazaei K. M. Near-Field Focused Array Microstrip Planar Antenna for Medical Applications // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2014. Vol. 13. pp. 951-954. doi: 10.1109/LAWP.2014.2322111.

14. Веденькин Д. А., Седельников Ю. Е. Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего радиоволнового контроля // Системы управления,

связи и безопасности. 2023. № 2. С. 131-146. doi: 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146.

15. Седельников Ю. Е., Кубланов В. С., Потапова О. В. Сфокусированные антенны-аппликаторы в задачах диагностической радиотермометрии // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 7.

16. Константиновская М. В., Григорьев В. С., Олискевич В. В., Раевская Е. Г. Разработка технологии и метода очистки химически загрязненного грунта с целью ликвидации накопленного экологического ущерба // Химическая безопасность. 2017. Т. 1. № 1. С. 101-122.

17. Полевик Н. Д. Методы и средства борьбы с сорной растительностью с использованием импульсных СВЧ-излучений: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. – Челябинск, Челябинский государственный агроинженерный университет, 2007. – 344 с.

18. Zhen L., Zhaozong M. A Review of Radio Frequency Non-destructive Testing for Carbon-fibre Composites // Measurement Science Review. 2016. Vol. 16. no. 2. pp. 68-76.

19. Данилов И. Ю., Седельников Ю. Е. Диагностика апертурных распределений антенн путем измерений в зоне ближнего излученного поля // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 1. С. 1-26.

20. Vedenkin D., Morozov O., Sedelnikov Y., Agliullin T., Nasybullin A. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum-Difference Signal Processing // Electronics. 2023. Vol. 12. no. 2. p. 436. doi: 10.3390/electronics12020436. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/2/436>.

21. Лучкин С. А., Седельников Ю. Е. Пространственно-распределенные радиотехнические средства связи и управления беспилотных авиационных комплексов // Нелинейный мир. 2008. Т. 6. № 1. С. 477-483.

22. Gardner R. A., Vargas H. I., Block J. B., Vogelbaum M. A., Moros E. G., Myerson R. J., Ryan J. R., Tupy S. J. Focused microwave phased array thermotherapy for primary breast cancer // Annals of Surgical Oncology. 2002. Vol. 9. pp. 326-332. doi: 10.1007/BF02573866.

23. Van der Linden R., Visser H. J. Analysis, design and realization of a near-field focused RF power transfer system // Journal of Physics: Conference Series. 2013. Vol. 476. no. 1. pp. 1-5.

24. Седельников Ю. Е., Веденькин Д. А. Антенные решетки, сфокусированные по широкополосному сигналу // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 3-1. С. 23-30.

25. Vedenkin D. A., Sedelnikov Yu. E., Nasybullin A. R. Antenna Arrays Focused on Broadband Signals // Journal of Telecommunications and Information Technology. 2016. Vol. 2016. no. 2. pp. 95-102.

26. Седельников Ю. Е., Тестоедов Н. А., Веденькин Д. А., Данилов И. Ю., Потапова О. В., Романов А. Г., Фадеева Л. Ю., Чони Ю. И. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля / Монография под ред. Ю. Е. Седельникова и Н. А. Тестоедова. – Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2015. – 308 с.

27. Веденькин Д. А. Сфокусированные антенные решетки в составе радиоэлектронных средств группы малоразмерных беспилотных летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07. – Казань: КГТУ им. А. Н. Туполева, 2012. – 138 с.

References

1. Bickmore R. W. On focusing electromagnetic radiators. *Canadian Journal of Physics*, 1957, vol. 35, no. 11, pp. 1292-1298.

2. Hansen R. C. Focal region characteristics of focused array antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, vol. 33, no. 12, pp. 1328-1337. doi: 10.1109/TAP.1985.1143539.

3. Graham W. J. Analysis and Synthesis of Axial Field Patterns of Focused Apertures. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, vol. AP-31, no. 4, pp. 665-668.

4. Potapova O. V., Sedelnikov Yu. E. Issledovanie kharakteristik elektromagnitnogo polya pri pogreshnostyakh realizatsii fokusiruyushchego fazovogo raspredeleniya [Investigation of Electromagnetic Field Characteristics under Errors in the Implementation of Focusing Phase Distribution]. *Journal of Radio Electronics*, 2024, no. 1. doi: 10.30898/1684-1719.2024.1.10 (in Russian).

5. Nizamutdinov R. R. *Issledovanie harakteristik linejnyh sfokusirovannykh antenn dlja radiovolnovykh tehnologicheskikh i diagnosticheskikh ustrojstv*. Diss. kand. tehn. nauk [Study of the Characteristics of Linear Focused Antennas for Radio Wave Technological and Diagnostic Devices. Ph.D. Thesis]. Kazan, KSTU named after A. N. Tupolev, 2011. 155 p. (in Russian).

6. Chou Hsi-Tseng, Yu Chien-Te. Design of phased array antennas with beam switching capability in the near-field focus applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2015, vol. 9, no. 11, pp. 1120-1127.

7. Kay A. Near-field gain of aperture antennas. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1960, vol. 8, no. 6, pp. 586-593. doi: 10.1109/TAP.1960.1144905.

8. Nepa P., Buffi A. Near-Field-Focused Microwave Antennas: Near-field shaping and implementation. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2017, vol. 59, no. 3, pp. 42-53. doi: 10.1109/MAP.2017.2686118.

9. Vedenkin D. A., Sedelnikov Yu. E. Svoistva sfokusirovannykh volnovykh polei v promezhutochnoi zone izlucheniya [Properties of Focused Wave Fields in the Intermediate Radiation Zone]. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"*, 2016, no. 1 (29), pp. 18-31 (in Russian).

10. Vedenkin D. A., Sedelnikov Yu. E., Nasybullin A. R. Fokusirovka elektromagnitnogo izlucheniya v dissipativnoi srede [Focusing of Electromagnetic Radiation in a Dissipative Medium]. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series "Radio Engineering and Infocommunication Systems"*, 2017, no. 3 (35), pp. 61-68 (in Russian).

11. Vedenkin D. A. Fokusirovannyye anteny dlya sistem radiosvyazi s gruppoy malorazmernykh letatel'nykh apparatov [Focused Antennas for Radio Communication Systems with a Group of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles].

Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy [Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems], 2007, vol. 10, no. 5, pp. 36-38 (in Russian).

12. Gee W., Lee S.-W., Bong N. K., Cain C. A., Mittra R., Magin R. L. Focused Array Hyperthermia Applicator: Theory and Experiment. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1984, vol. BME-31, no. 1, pp. 38-46. doi: 10.1109/TBME.1984.325368.

13. Tofigh F., Nourinia J., Azarmanesh M., Khazaei K. M. Near-Field Focused Array Microstrip Planar Antenna for Medical Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, vol. 13, pp. 951-954. doi: 10.1109/LAWP.2014.2322111.

14. Vedenkin D. A., Sedelnikov Yu. E. Focused antennas in non-destructive radio wave testing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 131-146. doi: 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146 (in Russian).

15. Sedelnikov Yu. E., Kublanov V. S., Potapova O. V. Sfokusirovannyye anteny-applikatory v zadachakh diagnosticheskoi radiotermometrii [Focused Applicator Antennas in Problems of Diagnostic Radiothermometry]. *Journal of Radio Electronics*, 2018, no. 7, p. 7 (in Russian).

16. Konstantinovskaya M. V., Grigor'ev V. S., Olishevich V. V., Raevskaya E. G. Razrabotka tekhnologii i metoda oчитki khimicheski zagryaznennogo grunta s tsel'yu likvidatsii nakoplennoy ekologicheskoy ushcherba [Development of Technology and Method for Cleaning Chemically Contaminated Soil to Eliminate Accumulated Environmental Damage]. *Chemical Safety Science*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 101-122 (in Russian).

17. Polevik N. D. Metody i sredstva bor'by s sornoi rastitel'nost'yu s ispol'zovaniem impul'snykh SVCh-izlucheniya [Methods and Means of Weed Control Using Pulsed Microwave Radiation. Ph.D. Thesis]. Chelyabinsk, Chelyabinsk State Agroengineering University, 2007. 344 p. (in Russian).

18. Zhen L., Zhaozong M. A Review of Radio Frequency Non-destructive Testing for Carbon-fibre Composites. *Measurement Science Review*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 68-76.

19. Danilov I. Yu., Sedelnikov Yu. E. Diagnostika aperturnykh raspredeleniy antenn putem izmereniy v zone blizhnego izluchennogo polya [Diagnostics of Antenna Aperture Distributions by Measurements in the Near-Field Zone]. *Journal of Radio Electronics*, 2016, no. 1, pp. 1-26 (in Russian).

20. Vedenkin D., Morozov O., Sedelnikov Yu., Agliullin T., Nasybullin A. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum-Difference Signal Processing. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 2, p. 436. doi: 10.3390/electronics12020436. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/2/436>.

21. Luchkin S. A., Sedelnikov Yu. E. Prostranstvenno-raspredelennyye radiotekhnicheskiye sredstva svyazi i upravleniya bespilotnykh aviatsionnykh kompleksov [Spatially Distributed Radio Communication and Control Means for Unmanned Aerial Systems]. *Nonlinear World*, 2008, vol. 6, no. 1, pp. 477-483 (in Russian).

22. Gardner R. A., Vargas H. I., Block J. B., Vogelbaum M. A., Moros E. G., Myerson R. J., Ryan J. R., Tupy S. J. Focused microwave phased array thermotherapy for primary breast cancer. *Annals of Surgical Oncology*, 2002, vol. 9, pp. 326-332. doi: 10.1007/BF02573866.

23. Van der Linden R., Visser H. J. Analysis, design and realization of a near-field focused RF power transfer system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 476, no. 1, pp. 1-5.

24. Sedelnikov Yu. E., Vedenkin D. A. Antennye reshetki, sfokusirovannye po shirokopolosnomu signalu [Antenna Arrays Focused on a Broadband Signal]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems], 2015, vol. 18, no. 3-1, pp. 23-30 (in Russian).

25. Vedenkin D. A., Sedelnikov Yu. E., Nasybullin A. R. Antenna Arrays Focused on Broadband Signals. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 2016, vol. 2016, no. 2, pp. 95-102.

26. Sedelnikov Yu. E., Testoedov N. A., Vedenkin D. A., Danilov I. Yu., Potapova O. V., Romanov A. G., Fadeeva L. Yu., Choni Yu. I. *Antenny, sfokusirovannye v zone blizhnego izluchennogo polja. Moonografiya* [Antennas focused in the zone of the near radiated field. Monography]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University Publ., 2015. 308 p. (in Russian).

27. Vedenkin D. A. Sfokusirovannye antennye reshetki v sostave radioelektronnykh sredstv gruppy malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Focused Antenna Arrays as Part of Radio-Electronics Means of a Group of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles. Ph.D. Thesis]. Kazan, KSTU named after A. N. Tupolev, 2012. 138 p. (in Russian).

Статья поступила 20 апреля 2026 г.

Информация об авторах

Веденькин Денис Андреевич – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость, сети и системы передачи данных. E-mail: denis_ved@mail.ru

Седельников Юрий Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Адрес: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10.

Antennas as part of broadband radio equipment

D. A. Vedenkin, Yu. E. Sedelnikov

Problem statement. During to designing broadband radio devices with antennas focused in the near-field zone, it is necessary to take into account the frequency dependence of their characteristics. For broadband signals, there is no unified approach to determining the spatial distribution of the electromagnetic field, and the possibility of focusing incoherent radiation remains insufficiently studied. **The purpose** is to identify and analyze the properties of broadband electromagnetic fields focused by linear and planar apertures in the near-field zone, including the case of incoherent radiation. **Methods.** The study is based on numerical simulation of electromagnetic fields generated by continuous and discrete apertures in the near-field zone, taking into account the spectral characteristics of the radiated signal, the method of its reception, and the conditions of radiation coherence. **Novelty.** For the first time, a systematic comparison of the properties of focused harmonic and broadband fields in the near-field zone has been carried out. The possibility of focusing incoherent broadband radiation by synchronizing the envelopes of radio pulses is demonstrated, which makes it possible to increase the field strength in a given area without increasing the total radiation power. **Result.** It is established that the spatial distributions of a broadband focused field significantly depend not only on the spectrum width of the radiated signal, but also on the frequency characteristics of the receiving path, as well as on the method of using the field energy (reception mode by a linear detector or power absorption mode in the medium). It is shown that when focusing incoherent radiation, synchronization of the envelopes of radio pulses allows increasing the field strength in a given area without increasing the total radiation power. **Practical relevance.** The obtained results can be used in the development of antenna systems for microwave diagnostics, medical radiothermometry, special radio communication and electronic warfare, as well as for constructing energy-efficient radio links with concentration of broadband field energy in a given spatial region.

Key words: focused antennas, near-field zone, broadband signals, antenna arrays, spatial field distribution, focusing, incoherent radiation.

Information about Authors

Denis Andreevich Vedenkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Docent. Associate Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility, networks and data transmission systems. E-mail: denis_ved@mail.ru

Yury Evgenyevich Sedelnikov – D.Sc. of Engineering Sciences. Full Professor. Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Field of research: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Address: 420111, Russia, Kazan, Karl Marx str., 10.